

線形代数学 II NO.5 要約

今日のテーマ: 直交射影を表す行列

まずは復習から: 計量ベクトル空間 V において、

- (1) 一次独立なベクトルたち v_1, v_2, v_3, \dots , が与えられているとする。これらは「三角変換」(補題 3.2 のような「三角行列」で書けるような変換) で直交系に直せた。
 - (a) v_1 をそのまま w_1 とおく。
 - (b) v_2 を v_1 の方向に歪めて $w_2 = *v_1 + v_2$ の形で v_1 と直交なベクトル w_2 を見つける。
 - (c) v_3 を v_1, v_2 の張るベクトル空間の適当な方向に歪めて, $w_3 = *v_1 + *v_2 + v_3$ の形で v_1, v_2 と直交なベクトル w_3 を見つける。
 - (d) 同様の操作を繰り返す。
- (2) さらに, w_1, w_2, w_3, \dots をおのおのの長さで割ることにより, 正規直交系を得ることができる。

これがシュミットの直交化法であった。 v_1, \dots, v_n を w_1, \dots, w_n で表す行列 Q は三角行列である。定理 3.3) すなわち, 三角行列 Q を用いて、

$$(w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n) = (v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_n)Q$$

と書くことができる。(なお, 定理 3.3 で書かれるものも 3.4 で書かれるものも「三角行列」と呼ばれ, 区別のためには前者を「狭義三角行列」とよんだりする。)

さて, 上の議論でとくに V が有限次元で, $\{v_i\}_{i=1}^n$ が V の基底である時を考えよう。 $A = (v_i \cdot v_j)_{i,j}$ を考えて, w_i として正規直交化したあとのものを採用すると, w_*, w_* は広義三角行列 Q で結ばれて, 内積の関係により, ${}^tQAQ = E$. つまり正規直交基底 w_* による座標系を採用すれば, V の内積は \mathbb{R}^n の標準的な内積と一致する。

つまり抽象的な内積の定義から始めた抽象的な計量ベクトル空間は, 有限次元ならばかならず \mathbb{R}^n に標準的な内積を入れたものと同じになる。

V が計量ベクトル空間, U がその有限次部分ベクトル空間のとき, u_1, \dots, u_k を U の正規直交基底に採ると, $Pw = w_U = (\sum_{i=1}^k (w, u_i)u_i)$ は U の元であって, $w^\perp = w - Pw$ は U^\perp の元, $w = w_U + w_{U^\perp}$ と分解できるのであった。 P は U への直交射影と呼ばれる。

次のことが問題である:

- 直交射影はどのような行列か?
- 逆にどのような行列は直交射影になりうるのか?

それを語るのに, 座標の付け替えの議論もする。ここで出てくるのが直交行列である。

以下では, 標準的な内積を用いる。

補題 5.1. $n \times r$ 行列 T に対して, ${}^tTT = E_r \Leftrightarrow T$ の列ベクトルは正規直交系。

正方行列 T に対して, T の列ベクトルが正規直交系をなすとき, T を直交行列と呼ぶ。

補題 5.2. n 次正方行列 T に対して, 次は同値である。

- (1) T は直交行列
- (2) ${}^tTT = E_n$
- (3) $T{}^tT = E_n$

補題 5.3. $n \times n$ 行列 A に対して次は同値である。

- (1) 行列 A はある r 次元部分ベクトル空間 $U \subset \mathbb{R}^n$ への直交射影に等しい。
- (2) ある r 次元部分ベクトル空間 $U \subset \mathbb{R}^n$ のある正規直交基底を列ベクトルとして並べた $n \times r$ 行列 T にたいして、 $A = T^t T$, ${}^t T T = E_r$.
- (3) ある $n \times r$ 行列 T が存在して $A = T^t T$, ${}^t T T = E_r$
- (4) $A^2 = A$, ${}^t A = A$.